

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760136

研究課題名（和文） チャンネル内遷移流の統一的理解を目指した乱流縞のメカニズムの解明

研究課題名（英文） Study on the turbulent stripe toward an unified concept of sub-critical transition in channel flow

研究代表者

塚原 隆裕（TSUKAHARA TAKAHIRO）

東京理科大学・理工学部機械工学科・助教

研究者番号：60516186

研究成果の概要（和文）：平行平板間乱流において大規模な計算領域を用いた直接数値計算および可視化実験を行い、その遷移レイノルズ数域の流れ場に内在する秩序構造の特性の解明を目指した。特に、準秩序的な乱れの間欠構造である乱流縞の発生条件や普遍性を調査し、回転系または非回転系内の平面ポアズイユ流および平面クエット流など、様々な流れ場について総合的に取り扱い、統一的な物理モデルを構築するための知見を集めた。

研究成果の概要（英文）：A series of large-scale DNS (direct numerical simulations) and flow-visualization experiments were conducted in two types of plane channel flows, i.e., plane Poiseuille flow and plane Couette flow, in the subcritical-transition regime. Both flows give rise to coexisting laminar and turbulent equilibrium regions in the form of oblique stripes, so-called the turbulent stripe. We found that the turbulence stripe is an intrinsic phenomenon for the transition and the reverse transition in a channel flow. According to the present results, we proposed a unified physical model for the transitional state and process of the turbulent channel flows.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	190,000	790,000
総計	3,100,000	940,000	4,040,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：壁乱流・乱流遷移・DNS

1. 研究開始当初の背景

工学分野で目にする多くの（マイクロ流路を除く）流れは乱流状態にあり、その流動特性の予測や、乱れの無い層流からの遷移条件・過程の理解は重要である。これは、乱流において活発な運動量の輸送が行われ、例えば同流量下でも層流時に比べて数倍～数十

倍のポンプ動力が必要（もしくは摩擦損失の増大）となるためである。乱流の詳細な運動量輸送メカニズムを解析する際には、厳密に支配方程式を数値的に解く手法、いわゆる直接数値シミュレーション（DNS）が有効なツールであり、一方では広範なパラメータ域における系統的な流動特性評価や実験実証を

得るには実々験が必要不可欠である。しかしながら、遷移域における DNS および実験例は数少ない。その理由として、層流化に近いレイノルズ数におけるチャンネル乱流（平行平板間乱流）では大規模な乱れの間欠的構造を生じ、それを十分に捉える解析や実験が困難であることが挙げられる。

壁乱流の構造や熱流動特性の研究を行う上で、しばしば解析対象となるカノニカルな流れ場は、圧力勾配駆動による流れの平面ポアズイユ流と、壁面相対運動により駆動される平面クエット流が挙げられ（図 1 参照）、ここでは総称してチャンネル乱流と呼ぶ。過去二十年で大型計算機の発達に伴い、チャンネル内ポアズイユ流において様々なレイノルズ数やプラントル数における DNS が行われてきたが、それらは完全発達した乱流場（摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 100$ 以上）に関する研究が多数である。特に、運動量や熱の輸送に大きく寄与する準秩序的構造の解明に関心が払われ、研究が盛んに行われてきた。一方、遷移レイノルズ数域（ $Re_\tau = 80$ 以下）の DNS は数限られており、遷移流にのみ現れる間欠構造については注目されていなかった。しかし、本研究に先立ち、本研究代表者らは現在までに以下の重要な知見を得てきた。

- (1) $Re_\tau = 56 \sim 80$ の平面ポアズイユ流において、円管内流のパフに似た現象が発生。
- (2) チャンネル流におけるパフは、乱流域が特徴的な斜めの構造（乱流縞）を呈する。
- (3) その空間スケールは、主流方向にチャンネル幅の 30 倍、スパン方向に 10 倍以上。
- (4) 乱流縞の有無は、各種乱流統計量・摩擦係数・臨界レイノルズ数に影響。

上記のことから、DNS では「従来よりも広大な計算領域」を、実験では「従来よりも高アスペクト比かつ長い助走区間をもつ流路装置」が明らかに必要である。しかし、未だ十分な実現はされていない。

主流方向に対して傾斜した乱流域を形成する乱流縞は、平面クエット流においても観察されている。また、テイラー・クエット流におけるスパイラル乱流とも酷似している。さらに研究代表者は、回転系平面クエット流において、スパン方向を軸に回転（コリオリの効果を付加）させた際、ある条件下で乱流場が間欠性を示し、乱流縞が観察されることを発見している。この場合、高いレイノルズ数でありながら、コリオリ力によって乱れが抑制され、遷移域に見られる構造を呈したと考えられる。これらの現象は、上記の平面ポアズイユ流のものと同程度の空間スケールと傾斜角を有しており、共通の現象と考えられる。しかし、乱流域が主流方向に対し傾斜して平衡状態になる原因、乱流縞の発生条件（レイノルズ数や流路形状）など、未解明である点は多い。

従来の DNS や実験では、主にマクロな可視化のみで、詳細なメカニズムの解明は行われていない。局在する乱流域に着目すれば、準秩序構造あるいは不安定周期解の存在が裏付けられる可能性もある。よって、大規模 DNS と可視化実験による乱流縞の解析を通して、平面ポアズイユ流・平面クエット流を含む遷移チャンネル流（回転系の場合も含む）の統一的な理解が実現されると期待できる。

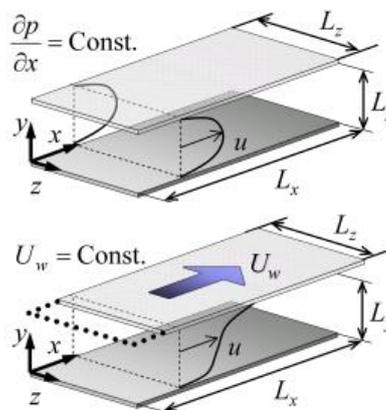


図 1 解析対象：(上図) ポアズイユ流れ、(下図) クエット流れ。水平方向には周期境界条件を与え、仮想的な無限平板間流路を模擬。

2. 研究の目的

平面ポアズイユ流と平面クエット流（それぞれ回転系の場合も含む）における乱流縞の解析を通して、チャンネル内遷移流における統一的な理解を目的とする。

本研究では、異なる流れ場（平面ポアズイユ流、平面クエット流）に対して、以下の多面的アプローチによる研究遂行を実現する。

- (1) 大型並列計算機による世界最大の計算領域を用いた DNS。
- (2) 高アスペクト比かつ長助走距離のチャンネル流路による実験。

大型並列計算機を用いることで、従来サイズの 3,000 倍に達する計算領域（解析ターゲットとなる乱流縞の空間スケールの十倍以上）による非物理的影響の十分少ない DNS 解析が期待できる。また、これと同程度以上のアスペクト比と助走区間を有するチャンネル流路を製作し、乱流縞の実験実証を行なう。本研究では、大規模な DNS・可視化実験の 2-way アプローチにより、遷移域の平面ポアズイユ流及び平面クエット流について下記事項を明らかにする。

- (1) 乱流縞の発生メカニズムと発生条件。
- (2) 乱流斑点から乱流縞への成長過程。
- (3) 乱流縞の流動特性と伝熱特性への影響。
- (4) 回転系における乱流縞の発生条件。

3. 研究の方法

遷移域ポアズイユ流の大規模 DNS を実施する。その上で、パラメータはレイノルズ数のみとするが、乱流縞（乱れの間欠性）の発生するレイノルズ数を厳密に調べ、さらに乱流縞のレイノルズ数依存性の調査のため、 $Re_\tau = 44 \sim 95$ を数段階に区切って解析を系統的に行う。その際に用いる計算領域は、 h を平板間距離として $320h \times h \times 200h$ 程度とする。この計算は、CPU メモリ約 1TB、一ケース当たり約 5 千 CPU 時間を費やすこととなる。主に大型並列計算機 SX-9（東北大学サイバーサイエンスセンター所有）を利用した。この大規模 DNS を通して、乱流縞の形状やスケールのレイノルズ数依存性も把握できる。一方で乱流縞の一筋を捉えるに足る中規模 DNS を実施し、詳細なメカニズムの解析を行う。その際に、乱流エネルギー（レイノルズ応力や温度バリエーション等も含め）収支の二次元空間分布を調べることで、乱流を局所的にも維持する要因、運動量輸送のメカニズムを解明していく。また、系の回転によるコリオリ力が流れに影響する場合においても、乱流縞やロールセル（大規模で規則的な縦渦構造）の形成・減衰過程を明らかにしていく。

実験においては、側壁の影響や助走距離不足が懸念されるため、DNS よりも大きなアスペクト比や長距離の助走区間が必要となる。本研究では、 $800h \times h \times 40h$ を確保した可視化実験を行なう。流れの可視化には、小片状粒子のフレークを用いた可視化実験を行い、DNS で得られた結果の検証を行う。フレーク粒子による実験で可視化されるものは、流体中の渦や乱れであり、粒子からの反射光の非均一性から層流または乱流を判断する手法である。

4. 研究成果

大規模な計算領域を用いた DNS および可視化実験を実施して、以下の知見を得た。

- (1) 遷移レイノルズ数域において、局所的にでも強い三次元的乱れ（乱流斑点など）が発生した場合には、乱流縞を伴う流れ場へと発達し平衡状態となる。パターン形成が局所の時空間で決められる摩擦レイノルズ数と密接な関係があることを見出した（図 2 参照）。
- (2) 乱流域が縞状になる機構として、スパン方向速度成分を含むレイノルズ応力の非一様性と二次流れが寄与しているものと考えられる。
- (3) 乱流縞に関わる乱れエネルギー輸送のメカニズムについても理解が進み、準層流域・乱流域間の乱流エネルギー輸送はほぼ無く、それぞれの領域で乱れの生成および散逸が行わ

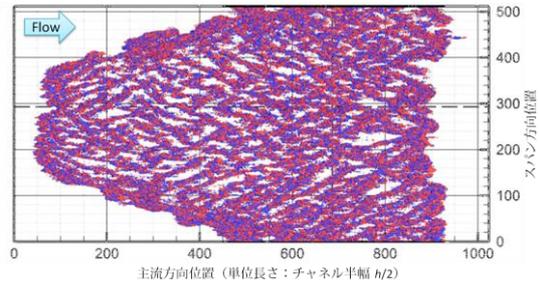


図 2 流量一定条件下の乱流斑点の成長後期。壁垂直方向の速度乱れの等値面を可視化している。チャンネル幅の 100 倍のオーダーまで成長すると、内部に乱れの間欠性を生じ、乱流縞特有のパターン形成が見られる。

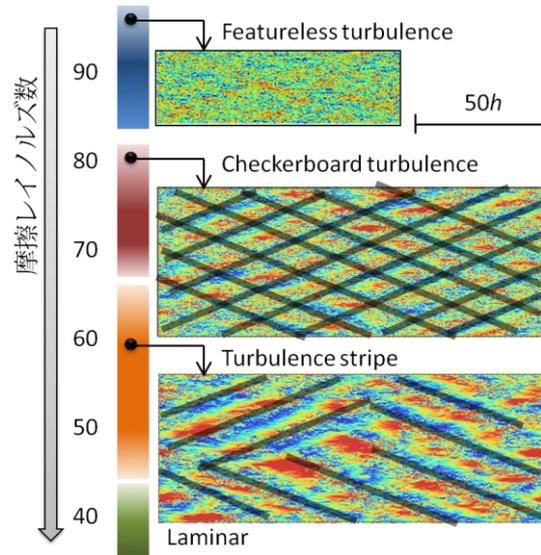


図 3 平面ポアズイユ流の層流化遷移過程。乱流域の分布パターンにおける摩擦レイノルズ数に減少に伴う変化。コンターはチャンネル中央面の主流方向速度変動成分を示し、黒帯は偏在する乱流域を示す。

れている。乱れ生成の比は、乱流域と準層流域でおおよそ 2 : 1 である。

- (4) 局所的に平衡な乱流を（長時間）維持し得る下限値は、摩擦レイノルズ数で $Re_\tau = 46$ または中央速度に基づくレイノルズ数で 960 を下回る。これは矩形ダクトによる一般的な実験結果よりもやや低い値となる。
- (5) 平面ポアズイユ流において、摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 70 \sim 80$ では乱れの間欠性を示すが、明瞭なバンド状の乱流域は形成されず、チェッカーボード状の乱流域、もしくはスタガード状の準層流域を呈する（図 3 参照）。
- (6) 平面クエット流に安定方向のコリオリ力を加えた際に現れる乱流縞は、乱れの維持に寄与しており、乱流縞を伴わない場合に比べて壁面摩擦が大きい（運動量輸送が活発である）。
- (7) 強い回転系内の平面ポアズイユ流では、コリオリ不安定によるロールセルが卓越し、

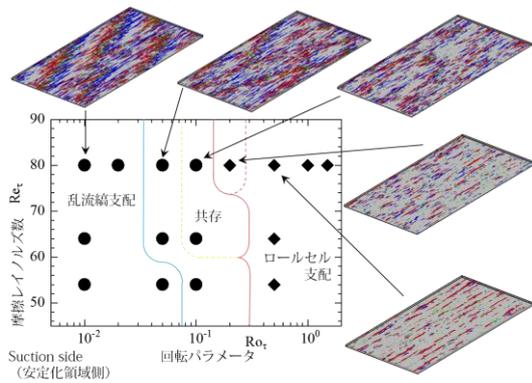


図 4 回転系平面ポアズイユ流におけるレイノルズ数-回転パラメータ空間の流れ状態遷移図。ここではコリオリ力が流れの安定化方向に働く Suction 側のみ示す。低回転時は乱流縞が支配的だが、回転パラメータの増加によりロールセルが支配的になる。

乱流縞が消失する。このような現象は、平面クエット流では見られない特徴的な現象である (図 4 参照)。

以上の成果の通り、遷移域の流れ場に内在する秩序構造について、その特性の理解が進められたことは工学分野のみならず流れの不安定性問題に重要な指針を与えるものである。回転系または非回転系内の平面ポアズイユ流および平面クエット流などの様々な流れ場について総合的に取り扱い、遷移レイノルズ数域チャンネル流について統一的な物理モデルを構築するための知見を集めた。これに際し、DNS を広いパラメータ域で実施し、より精緻な乱流モデルの改善に有用な DNS データベースを構築している。

本研究で得られた成果は、国内外の会議において公知し、海外学術雑誌論文を通して多数編に亘り発表を行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Xuan Wu, Nozomi Washio, Hiroshi Aida, Takahiro Tsukahara, Yasuo Kawaguchi, Bo Yu, PIV study on intermittent flow structure in Poiseuille channel flow at transitional Reynolds number, Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University, Vol. 47, No. 1, 2013, 101-106, (in Chinese). 査読有
- ② Takahiro Tsukahara, Structures and turbulent statistics in a rotating plane Couette flow, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 318, 13th

European Turbulence Conference, 2011, 022024, (11 pages). 査読有
doi:10.1088/1742-6596/318/2/022024

- ③ Kyohei Ohnishi, Takahiro Tsukahara, Yasuo Kawaguchi, Turbulence budget in transitional plane Couette flow with turbulent stripe, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 318, 13th European Turbulence Conference, 2011, 032033 (11 pages). 査読有
doi:10.1088/1742-6596/318/3/032033

[学会発表] (計 17 件)

- ① Takahiro Tsukahara, Takahiro Ishida, Yohann Duguet, Turbulent-spot development in constant-mass-flux channel flow, 14th EUROMECH European Turbulence Conference, Lyon, France, Sep. 1-4, 2013. 査読有
- ② Takahiro Ishida, Takahiro Tsukahara, Yasuo Kawaguchi, DNS of rotating turbulent plane Poiseuille flow in low Reynolds- and rotation-number ranges, The iTi (interdisciplinary turbulence initiative) 2012, Bertinoro, Italy, Oct. 1-3, 2012.
- ③ Hiroshi Aida, Takahiro Tsukahara, Yasuo Kawaguchi, Development process of a turbulent spot into stripe pattern in plane Poiseuille flow, The Seventh International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Ottawa, Canada, July 28-31, 2011. 査読有
- ④ Takahiro Tsukahara, Transition to/from turbulence in subcritical flows between two infinite parallel plates, Korea-Japan CFD Workshop 2010, Pohang, Korea, Nov. 19, 2010. 招待講演

[その他]

ホームページ等

<http://murasun.me.noda.tus.ac.jp/db/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塚原 隆裕 (TSUKAHARA TAKAHIRO)

東京理科大学・理工学部機械工学科・助教

研究者番号: 60516186